

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ВАРИАНТ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОЙ ЗАГОТОВКИ

## TECHNOLOGICAL VARIANT FOR MANUFACTURING A HOLLOW BILLET

Буркин С.П., Коршунов Е.А., Бабайлов Н.А., Исаков Р.Ф.  
Уральский федеральный университет, г.Екатеринбург, spb@mtf.ustu.ru

Analyzed by known methods of casting hollow billets for pipes. A principally new technological schemes casting. One option is the casting of hollow billets up of hermetic tundish. High cooling rate and cyclic motion of the melt along the crystallization front for high quality structure and properties of the metal. In another embodiment, ingot is formed freezing metal by a hollow water-cooled mold. This method of casting, founded theoretical analysis provides a high quality of internal surface of the ingot and the ability to manufacture bimetallic billets.

Keywords: hollow ingots, cast up, cast freezing, bimetallic billet solidification kinetics.

### Введение

Как сплошные, так и полые оси вагонных колесных пар целесообразно изготавливать ковкой на радиально-обжимных машинах, оснащенных двумя манипуляторами, причем при ковке полых осей полая заготовка проковывается по традиционной технологии на гладкой оправке (дорне), извлекаемой из поковки после завершенияковки.

Принципиальным элементом технологии производства качественных, равнопрочных со сплошными, полых осей является изготовление исходных полых заготовок. В настоящее время известно достаточно много вариантов формирования осевой полости в заготовке под последующую прокатку или радиальную ковку:

- сверление катаных или непрерывнолитых сплошных заготовок;
- прошивка сплошных заготовок на косовальковых станах поперечно-винтовой прокатки;
- центробежное литье полых заготовок;
- полу- или непрерывное литье полых заготовок в вертикальных или криволинейных МНЛЗ через кристаллизаторы с графитовыми дорнами;
- формирование полых заготовок полунепрерывной отливкой в вертикальный кристаллизатор с подачей жидкого металла вверх из герметичного промежуточного ковша за счет избыточного давления газа над зеркалом расплава;
- формирование полых заготовок литьем методом намораживания металла на полый водоохлаждаемый кристаллизатор, являющийся частью будущей поллой заготовки;
- прессовая прошивка сплошных заготовок в контейнере вертикального или горизонтального гидравлического пресса.

### Сравнительный анализ известных технологий

При сопоставлении перечисленных вариантов и выборе наиболее рационального разумно разделить техпроцессы изготовления поллой ковочной заготовки на две группы. В одну включаются процессы формирования полости в первоначально сплошных литых или катаных заготовках. В другую группу – способы формирования полых заготовок из расплава.

Сплошные заготовки при любых способах изготовления характеризуются ликвационной неоднородностью. Чем больше исходное сечение

слитка, тем больше степень химической неоднородности по сечению. Например, крупный слиток, поступающий на блюминговую прокатку, всегда имеет повышенную концентрацию углерода и большинства примесей в осевой зоне. Перераспределять по сечению слитка легирующие и примесные элементы гомогенизационным отжигом нерационально, из-за длительности процесса при малой скорости диффузии элементов в литом металле и большого энергопотребления при такой термической обработке. Продольная прокатка на блюминге вследствие больших вытяжек формирует достаточно острую продольную текстуру деформации, которая при столь интенсивной деформации наследуется рекристаллизованной структурой. То есть текстура деформации переходит в текстуру рекристаллизации. Текстурированный слиток характеризуется анизотропией коэффициентов диффузии. Последние значительно выше в направлении текстуры, то есть в направлении оси прокатки. В итоге, после завершения обжимной прокатки блюм полностью наследует химическую неоднородность по сечению слитка. Пониженная пластичность высокоуглеродистой и достаточно грязной по примесям металла осевой зоны создает опасность осевых разрывов (скворечен) при последующей ковке. Разрывы и скопления примесей служат концентраторами напряжений и резко снижают усталостную прочность, в частности, кованых железнодорожных осей. В этом плане удаление металла осевой зоны катаной заготовки целесообразно. Наличие полости с гладкой поверхностью, скорее всего, приведет к повышению срока службы оси, работающей в условиях знакопеременных нагрузок.

Удаление дефектной осевой зоны из первоначально сплошных слитков или катаных заготовок возможно либо сверлением, либо закрытой прессовой прошивкой полым прошивком. Оба процесса малоэффективны из-за низкой производительности и большого расхода дорогостоящего режущего или деформирующего инструмента, что делает их непригодными в массовом производстве. Следует также учитывать наличие большого количества поверхностных дефектов как после сверления, так и после прессовой прошивки. Поэтому внутренняя поверхность заготовки нуждается в

дополнительной обработке, с целью повышения эксплуатационных свойств осей колесных пар.

К высокопроизводительным способам прошивки сплошных литых и предварительно деформированных заготовок в настоящее время относят поперечную косовальковую прокатку, при которой в результате интенсивной знакопеременной деформации сечения и действия высоких диаметральных растягивающих напряжений происходит разрушение металла осевой зоны. В раскрывшуюся полость вводится оправка, формирующая цилиндрические отверстия. При этом, естественно, металл осевой зоны не удаляется, а оттесняется из центра в стенку полой заготовки. Следовательно, ликваты теперь располагаются во внутреннем поверхностном слое заготовки. Если проводится прокатка литой заготовки с пониженной пластичностью, то возможно образование сетки трещин на внутренней поверхности прошитой заготовки. Охлаждение гильзы после горячей прошивки и нагрев её перед последующей ковкой создает все условия для окисления границ трещин, что затрудняет сварку краев трещин во время радиального обжатия на РКМ.

Все варианты прошивки сплошных заготовок в условиях машиностроительного производства предполагают внешние поставки либо литого, либо катаного металла и исключают возможность влиять на качество поставляемого металла.

Представляется перспективным рассмотрение и анализ второй группы способов формирования полых ковочных заготовок непосредственно из расплава.

Несмотря на актуальную возможность приобретения серийных машин центробежного литья, получение центробежнолитых полых заготовок не позволит решить проблему получения качественных осей из-за ряда принципиальных недостатков этого способа разливки металла и, в частности стали. Подача жидкого металла во вращающуюся изложницу из промежуточного раздаточного ковша через лоток осуществляется всегда открытой струёй, что неминуемо загрязняет металл окислами, которые либо всплывают к внутренней поверхности (при высокой степени перегрева металла), либо располагаются послойно в глубине отлитой заготовки (при малом перегреве расплава). В первом случае требуется обязательная и малопроизводительная расточка внутренней поверхности достаточно длинной заготовки, а во втором – брак остается признать окончательным. Кроме того, в серийном производстве при центробежном литье в охлаждаемую вращающуюся изложницу трудно избежать дефектов наружной поверхности, связанных с образованием «корольков». Поэтому гарантия качества центробежно отлитых заготовок появляется лишь после стопроцентной механической обработки литых полых заготовок.

Получение полых заготовок на вертикальных или криволинейных МНЛЗ является

достаточно производительным способом, обеспечивающим, кроме того, высокое качество металла, поскольку двухсторонний отвод тепла из зоны кристаллизации через водоохлаждаемые кристаллизатор и дорн обеспечивает быстрое охлаждение расплава и подавление ликвационных процессов. При использовании графитовых дорнов литая заготовка приобретает вполне удовлетворительное качество внутренней поверхности, а при установке индуктора на выходе кристаллизатора перед зоной вторичного охлаждения легко достигается измельчение зерна и устранение дендритов. В итоге, для получения качественных полых осей из заготовки сравнительно малого сечения ковкой на РКМ достаточно умеренных обжатий.

Строительство МНЛЗ относится к дорогостоящим реконструктивным мероприятиям и его возможность решается на уровне плана развития всего предприятия. При этом следует учитывать, что технология непрерывного литья полых стальных заготовок в настоящее время далеко не совершенна, а непрерывнолитые полые, в частности трубные заготовки успешно производятся лишь в цветной металлургии. Известные конструкции кристаллизаторов для разливки стали нуждаются в совершенствовании, поскольку закрепление дорна на входе в кристаллизатор затрудняет ввод погружных стаканов с достаточным проходным сечением.

#### **Литье полых заготовок вверх**

Целесообразно в качестве промышленно пригодных рассматривать два способа из перечисленных, основанных на вытеснении расплава стали вверх в зону формирования полого слитка из герметичного промежуточного ковша. Оба способа и конструктивные варианты установок разработаны и частично опробованы при выполнении Государственной научно-технической программы «Ресурсосберегающие и экологически безопасные процессы горно-металлургического производства», реализуемой при государственном финансировании сотрудниками проблемной лаборатории черной и цветной металлургии УГТУ-УПИ в период с 1985 по 1992 г.г.

При отливке полых заготовок вверх с подачей металла из герметичного промежуточного ковша в кристаллизатор, установленный на крышке металлоприемника, возможны многочисленные конструктивные исполнения литейной машины, но принцип формирования литой заготовки остается неизменным. Металлопровод погружен в расплав, поэтому металл, передаваемый в кристаллизатор, защищен от окисления без применения покровных шлаков. В начале разливки верхняя часть кристаллизатора закрывается крышкой. При создании в герметичном промковше избыточного давления расплав металла через металлопровод поступает в кристаллизатор, заполняя его полностью до соприкосновения с крышкой, которая обеспечивает перемораживание сечения будущего полого слитка в его верхней части. После паузы

определенной длительности давление в ковше сбрасывается и незакристаллизовавшийся металл опускается вниз. В кристаллизаторе остается замороженный корковый металл. Толщина корки зависит от степени перегрева расплава и длительности паузы. При оптимальном уровне перегрева (30...40<sup>0</sup>С для углеродистых сталей) толщина корки определяется по правилу квадратного корня. Внутри полого слитка при сбросе металла образуется торичеллева пустота и, следовательно, окисление поверхности невозможно. Последовательно повторяя цикл подачи и сброса расплава, послойно намораживают слитки с требуемой толщиной стенки. Высокая скорость охлаждения и восстановление усредненного химического состава сплава в каждом цикле подачи металла обеспечивают однородность состава и структуры в объеме полого слитка. Удастся полностью подавить ликвационные процессы и получить достаточно мелкое зерно без применения модификаторов. Опытные разливки показали возможность получения качественных полых заготовок с однородным химсоставом и мелкозернистой структурой даже из алюминий-литиевых сплавов, в которых литий проявляет высокую склонность к ликвации.

При разработке наиболее работоспособной, с высоким уровнем статической, динамической и усталостной прочности конструкции вагонной оси нельзя пренебрегать рассмотрением варианта применения биметаллической заготовки (упрочненный плакирующий слой и вязкая сердцевина).

При двухковшовом исполнении литейной машины возможно получение полых биметаллических заготовок из металлов и сплавов при условии, что коэффициент усадки у сплава плакировки больше, чем у сплава сердечника. В противном случае возможно расслоение отлитой заготовки по межслойной границе, как это можно видеть на фотографии темплета биметаллического литого слитка, полученного отливкой вверх из двух герметичных ковшей. При близких или равных коэффициентах усадки компонентов слитка можно обеспечить отсутствие расслоения рациональным подбором температур перегрева расплавов, длительности пауз в циклах подачи металлов в кристаллизатор. Следует учитывать, что получение качественного слитка в последнем случае возможно не при любом соотношении толщин слитка биметалла, а лишь при сравнительно тонкой плакировке и большой суммарной толщине стенки полой заготовки.

Конструкция двухковшовой МНЛЗ для отливки вверх полых заготовок показана на схеме рис. 1. Изображен лишь один промежуточный ковш, второй расположен симметрично по отношению к оси разливки.

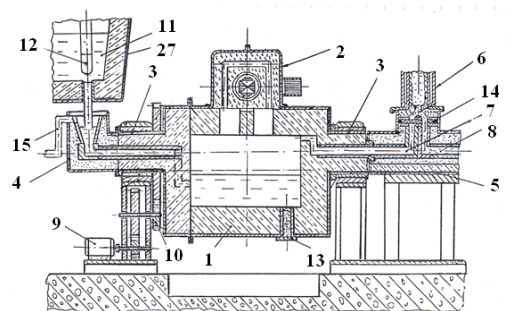


Рис. 1. Конструкция двухковшовой литейной машины для изготовления полых биметаллических заготовок: 1 – металлоприемник; 2 – каналная печь;

3 – поворотные цапфы; 4 – заливочная воронка; 5 – литейная коробка;

6 – кристаллизатор; 7, 8 – металлопроводы; 9 – электропривод; 10 – редуктор;

11 – транспортный ковш; 12 – стопор; 13 – сливная летка; 14 – шибберный затвор;

15 – трубопровод подачи давления в промковш

Внешний вид литейной машины с условным осевым разрезом показан на рис.2.

Формирование полого слитка начинается с подачи сжатого (желательно защитного) газа в промковше через патрубок 15. Шибберный затвор 14 второго металлоприемника перекрывает металлопровод 8. Давлением газа расплав из промковша 1 через металлопровод 7 передается в кристаллизатор 6, заполняя его полностью до соприкосновения с перемораживающей крышкой. Возможна разливка полого слитка и без перемораживания его верхнего торца, но в этом случае можно избежать окисления внутренней поверхности кристаллизующегося слитка за счет подачи инертного газа. После паузы длительностью, определенной условиями кристаллизации, давление в ковше понижается, и расплав из кристаллизатора сбрасывается обратно в металлоприемник. В кристаллизаторе остается замороженная корковая часть будущего слитка. Цикл подачи и сброса металла повторяется несколько раз до получения требуемой толщины плакирующего слоя заготовки. Далее шиббером 14 перекрывают металлопровод 7 и открывают канал 8 для подачи металла из второго промковша. Процедура формирования внутреннего слоя слитка совершенно аналогична. По завершению процесса намораживания обоих слоев заготовки ковши разворачиваются на 180<sup>0</sup> для заливки в них металла. При сливе «болота» разделяется летка 13 и от металла освобождаются как сам ковш, так и каналы печи. Послойное намораживание при движении расплава вдоль фронта кристаллизации и циклический возврат металла в металлоприемник дают возможность полностью подавить ликвацию легирующих примесей и сформировать слиток однородный по химическому составу.

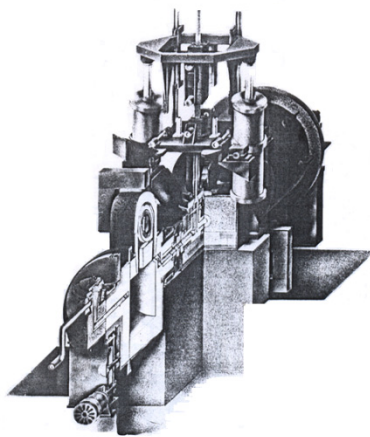


Рис. 2. Внешний вид двухковшовой литейной машины с условным осевым разрезом одного из ковшей

В другом технологическом варианте при использовании внутреннего кристаллизатора удается избежать появления межслойного зазора в слоистой заготовке. Кристаллизатор в этом случае представляет собой заглушенную снизу трубу, внутрь которой подается охлаждающая среда, характеризующая коэффициентом теплоотдачи. Если материал трубы совпадает с материалом отливаемого методом намораживания слитка, то формируется полая монометаллическая заготовка. В противном случае – биметаллическая. Кристаллизатор является элементом разового использования, и его внутренняя поверхность становится внутренней поверхностью литой полый заготовки. Схема процесса формирования полый заготовки намораживанием на трубу-кристаллизатор показана на рис. 3.

Плавильный агрегат или промежуточный ковш снабжает жидким металлом дополнительную емкость, которая соединена с основной емкостью печи или ковша донным металлопроводом. Труба 2, играющая роль кристаллизатора, помещается вертикально в дополнительную емкость. Либо за счет избыточного давления газа в промковше (если он герметичен), либо за счет управления магнито-гидродинамическим устройством и вращением расплава в ковше, или плавильном агрегате металл поднимается и кристаллизуется на поверхности трубы-кристаллизатора 2, формируя слиток 1. Для предотвращения ликвации расплав также как и в предыдущем технологическом варианте, циклически поднимается и опускается в дополнительной емкости. После получения требуемой толщины стенки труба-кристаллизатор вместе с замороженным слитком поднимается вверх, проходя при этом через огнеупорное или графитовое кольцо 3. Затем отрезается верхняя и донная части заготовки. Заготовка протачивается снаружи, чем обеспечивается коаксиальность цилиндрических поверхностей. При механической обработке труба-кристаллизатор используется для зацентрировки заготовки.

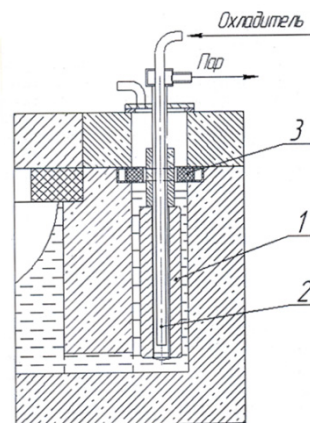


Рис. 3. Схема процесса формирования полый слитка намораживанием на трубу-кристаллизатор

Интенсивность охлаждения трубы-кристаллизатора определяется выбором охладителя (воздух, водо-воздушная смесь, вода) и регулируется скоростью его подачи. Это дает возможность поддерживать температуру трубы на заданном уровне и, в случае необходимости, предусматривать упруго-пластическое сжатие кристаллизатора, с целью разгрузки кристаллизующегося слитка от термоупругих напряжений, возникающих при усадке металла в процессе затвердевания.

Кинетика затвердевания и температурный режим кристаллизатора и заготовки и оценка уровня возникающих при кристаллизации и последующем охлаждении заготовки термоупругих напряжений могут быть определены в результате решения тепловой задачи с учетом фазовых превращений. Далее показана возможность теоретического анализа этого технологического варианта литья полых моно- и биметаллических заготовок, в частности дляковки осей.

#### Теоретический анализ МКЭ процесса формирования полых заготовок

При изучении формирования слитка в ходе остывания расплава целесообразно разделить процесс на два уровня – кристаллизацию (тепло-кинетический, физико-химический и гидродинамический уровни) и затвердевание (тепловой уровень). Т.е. теорию формирования отливки условно можно разделить на теорию кристаллизации и теорию затвердевания.

Под кристаллизацией в теории литейных процессов понимается процесс формирования структуры слитков при переходе металла (сплава) из жидкого состояния в твердое. Важность проблемы кристаллизации металлов определяется тем, что процесс роста кристаллов и получающаяся в его результате структура оказывают значительное влияние на свойства литого металла и качество слитков.

Под затвердеванием понимается макроскопический процесс отвердевания расплава, характеризуемый в терминах современных феноменологических теорий переноса – теории

теплопроводности и диффузии, гидродинамики и термопластичности. В частности, затвердевание слитка включает явления переноса тепла из центральных, более горячих зон слитка через отвердевшую часть слитка (корку) к внешней охлаждающей поверхности. Эти явления могут быть описаны с помощью понятий: температура, энтропия, отвердевшая часть металла (толщина твердой корки), теплофизические свойства металла. Затвердевание металла в более широком понимании включает описание гидродинамических явлений в незатвердевшей части слитка и выражается в терминах современной гидродинамики, а также описание термических деформаций и напряжений в твердой корке слитка, непосредственно зависящих от температурного поля в корке и термомеханических свойств металла в области повышенных температур.

Характерной чертой процесса теплового взаимодействия отливки и формы при литье намораживанием является большая интенсивность охлаждения отливки. Объясняется это не только использованием преимущественно водоохлаждаемых форм, но и тем, что процесс намораживания на поверхности формы происходит, как правило, в течение весьма короткого времени.

Опыт освоения ряда способов намораживания показывает, что решающее влияние на процесс формирования корочки оказывает именно воздействие перегретого жидкого металла с фронтом кристаллов, растущих от поверхности формы. Перегретый жидкий металл, омывая затвердевшую корочку, замедляет ее рост, частично оплавляет и разрушает фронт растущих кристаллов. Последнее особенно резко выражено при литье способами намораживания в потоке и определяет кинетику намораживания и характер процесса формирования кристаллической структуры корочки.

В настоящем разделе методом конечных элементов в качестве представительного примера рассмотрен процесс формирования полой заготовки из стали 30ХГСА, плакированной внутри нержавеющей сталью 12Х18Н9Т. Формирование

заготовки из расплава осуществляется на наружной поверхности, охлаждаемого изнутри водой цилиндрического кристаллизатора с внутренним диаметром –  $D_B = 2R_B = 70$  мм. и наружным –  $D_H = 2R_H$ . Внутренний диаметр дополнительной емкости для получения биметаллической заготовки –  $D_A = 2R_A = 500$  мм. Труба-кристаллизатор с нижней стороны заглушена корундовой пробкой.

При моделировании процесса затвердевания биметаллической заготовки решаются три задачи:

- определение времени затвердевания заготовки диаметром  $D_3 = 200$  мм в зависимости от технологических параметров процесса разлива (для определения производительности процесса кристаллизации);
- определение возможности расплавления внутренней трубы-кристаллизатора (для определения оптимальной толщины внутреннего слоя заготовки);
- моделирование процесса получения биметаллической заготовки (полная модель процесса).

Расчетная схема процесса приведена на рис. 4. Решение задачи выполняется в осесимметричной постановке.  $R_B = 0,035$  м;  $R_A = 0,25$  м;  $h = 0,012$  м;

$$R_H = R_B + s.$$

Варьируемые параметры процесса: толщина стенки кристаллизатора  $S$  (5, 7,5 и 10 мм); степень перегрева расплава  $T_{M0}$  (1550, 1600 и 1650<sup>0</sup>С); коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  на внутренней стенке кристаллизатора, зависящий от расхода воды на охлаждение (250, 500, 750, 1000 и 1250 Вт/м<sup>2</sup>·К); материал кристаллизатора – сталь 30ХГСА (ГОСТ 4543-71), 12Х18Н9Т (ГОСТ 5632-72).

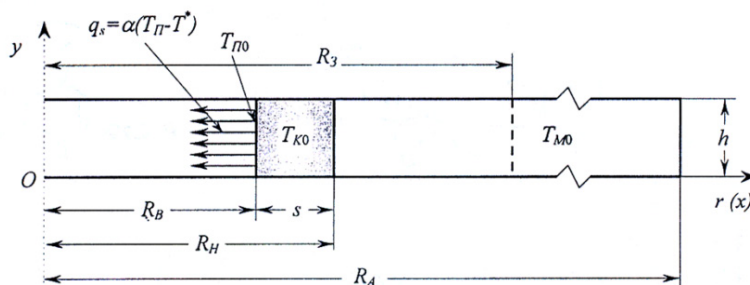


Рис. 4. Расчетная схема процесса формирования биметаллической заготовки

На внутренней поверхности кристаллизатора принимаются граничные условия III рода, т.е. задается зависимость плотности теплового потока вследствие теплопроводности со стороны тела от температур поверхности тела и окружающей среды. Температура внутренней поверхности кристаллизатора принимается равной

$T_{n0} = 30^{\circ}\text{C}$ , температура окружающей среды (охлаждающей воды) –  $T^* = 30^{\circ}\text{C}$ . Теплообменом между расплавленным металлом и стенкой агрегата при решении этой задачи пренебрегаем.



Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  на внутренней стенке кристаллизатора является важным технологическим параметром процесса кристаллизации. Выбор значений коэффициента теплоотдачи выполняется в соответствии с данными табл. 1.

При решении задачи  $\alpha_k$  принят для струйного охлаждения, варьируется от 250 до 1250 Вт/м<sup>2</sup>·К.

Струйное охлаждение обеспечивает самую высокую интенсивность охлаждения. Удельные

расходы воды при струйном охлаждении могут превышать 10 л/кг.

Однако пропорциональное увеличение теплоотвода (по данным многочисленных исследований) происходит при увеличении удельного расхода до 5 л/кг. Увеличение расхода воды свыше 6,5...7 л/кг практически не влияет на величину теплоотвода. При интенсивности струйного охлаждения  $\alpha_k = 2500$  Вт/м<sup>2</sup>·К и выше возможно возникновение термических напряжения и внутренних трещин.

Таблица 1

Характеристика способов охлаждения, применяемых при кристаллизации

Тип охлаждения	Удельный расход воды, л/кг	$\alpha_k$ , Вт/м <sup>2</sup> ·К
Струйное	до 10 и выше	2000...4000
Форсуночное жесткое	1...2	1000...1500
Ролико-форсуночное (смягченное)	0,5...1	300...500
Роликовое (мягкое)		200...300
Экранное		100...150
Водо-воздушное	воды – 0,2...12 л/мин воздуха – 50...400 л/мин	250...500
Паро-воздушное и воздушное		150...200

Зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода воды в зоне вторичного охлаждения приведена на рис. 5.

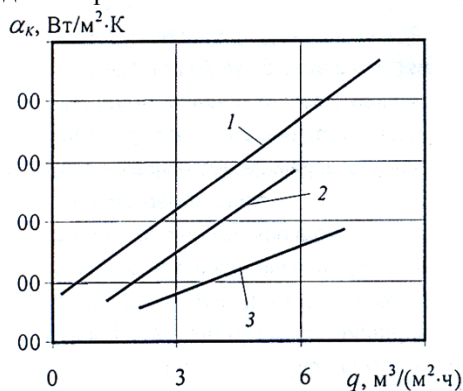


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода воды: 1 – струйное охлаждение; 2 – брусевое охлаждение; 3 – ролико-форсуночное охлаждение

Зависимость температуры внутренней поверхности трубы-кристаллизатора от условий теплообмена (коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$ ) приведена на рис. 6. Здесь приведена температура  $T_{\text{п}}$  в момент получения заготовки диаметром 150 мм. Следует отметить, что эта зависимость характерна для всего исследуемого интервала изменения значений варьируемых параметров (материал трубы-кристаллизатора,  $S$ ,  $T_{\text{к0}}$ ) с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

Главной целью решения всех задач затвердевания является построение так называемых

кинетических кривых затвердевания  $\bar{\xi} = \xi/R$  (где  $\xi$  – толщина затвердевшей корочки;  $R$  – характерный размер, например, радиус цилиндрической отливки при разливе в изложницу). Для способа намораживания на внешней поверхности трубы-кристаллизатора выбираем величину  $R$ , равную  $R_A - R_n$ .

Графики функций  $\bar{\xi} = \xi/(R_A - R_n)$  приведены на рис. 7. Используя кинетические кривые затвердевания можно определить фронт кристаллизации отливки (геометрические размеры отливки) в любой момент времени затвердевания отливки. В частности можно определить положение фронтов солидуса, ликвидуса и др. изотермы.

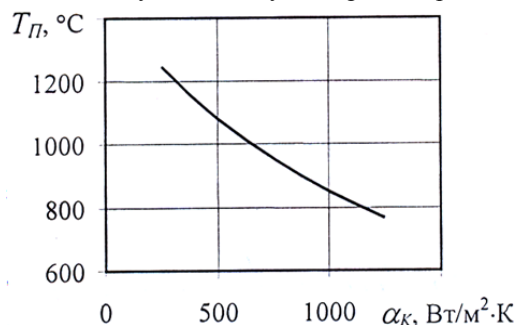


Рис. 6. Температура внутренней поверхности кристаллизатора при затвердевании

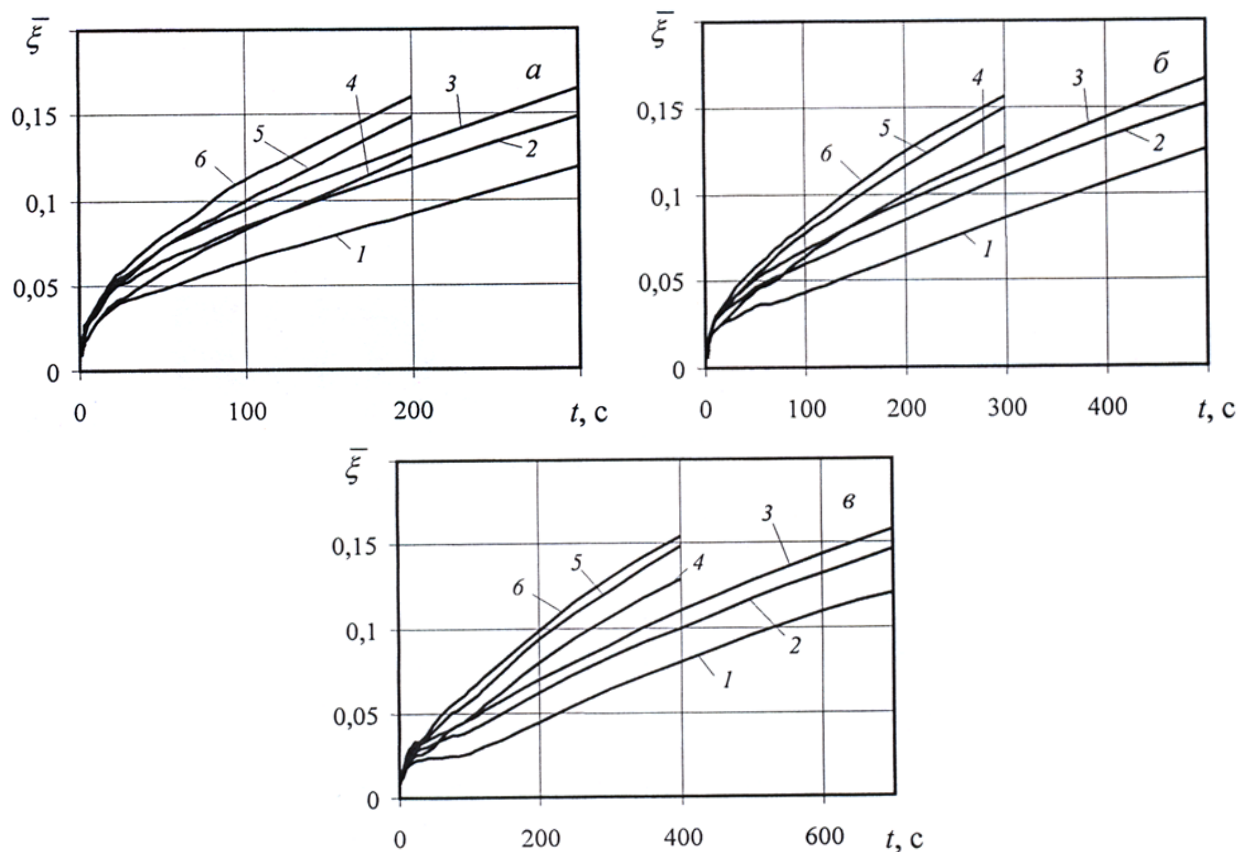


Рис. 7. Кинетические кривые затвердевания для  $T_{m0}=1550^{\circ}\text{C}$  (а),  $T_{m0}=1600^{\circ}\text{C}$  (б) и  $T_{m0}=1650^{\circ}\text{C}$  (в): 1 – изотерма солидуса  $T_s=1445^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_k=500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ; 2 – изотерма затвердевания  $T_3=1480^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_k=500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ; 3 – изотерма ликвидуса  $T_L=1495^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_k=500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ; 4 – изотерма солидуса  $T_s=1445^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_k=1000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ; 5 – изотерма затвердевания  $T_3=1480^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_k=1000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ ; 6 – изотерма ликвидуса  $T_L=1495^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_k=1000 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$

Результаты расчета времени затвердевания  $t_3$  (для фронта затвердевания при  $T_3=1480^{\circ}\text{C}$ ) для материала трубы-кристаллизатора 30ХГСА приведены в табл. 2, а для материала трубы-кристаллизатора 12Х18Н9Т – в табл. 3. В расчетах температура охлаждающей среды принята равной  $30^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, в результате расчетов получены кинетические кривые затвердевания в процессе литья намораживанием на внешней

поверхности охлаждаемой трубы-кристаллизатора для различных технологических параметров литья стали 30ХГСА. Кинетические кривые затвердевания позволяют определить время затвердевания отливки (при заданных размерах получаемой отливки) и геометрические размеры получаемой отливки (если известно время затвердевания).

Таблица 2

Результаты расчета времени затвердевания  $t_3$  (для фронта затвердевания при  $T_3=1480^\circ\text{C}$ ), материал кристаллизатора – 30ХГСА

$T_{\text{м0}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$t_3, \text{с}$	$T_{\text{м0}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$t_3, \text{с}$	$T_{\text{м0}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$t_3, \text{с}$
$S=5 \text{ мм}$			$S=7,5 \text{ мм}$			$S=10 \text{ мм}$		
1650	250	1700	1650	250	1610	1650	250	1530
	500	773		500	735		500	685
	750	545		750	515		750	485
	1000	444		1000	420		1000	398
	1250	385		1250	367		1250	345
1600	250	1110	1600	250	1030	1600	250	768
	500	552		500	515		500	472
	750	405		750	377		750	347
	1000	334		1000	314		1000	292
	1250	293		1250	275		1250	259
1550	250	662	1550	250	595	1550	250	510
	500	368		500	332		500	294
	750	280		750	256		750	229
	1000	237		1000	217		1000	197
	1250	211		1250	195		1250	178

Таблица 3

Результаты расчета времени затвердевания  $t_3$  (для фронта затвердевания при  $T_3=1480^\circ\text{C}$ ), материал кристаллизатора – 12Х18Н9Т

$T_{\text{м0}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$t_3, \text{с}$	$T_{\text{м0}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$t_3, \text{с}$	$T_{\text{м0}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_{\text{к}}, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$t_3, \text{с}$
$S=5 \text{ мм}$			$S=7,5 \text{ мм}$			$S=10 \text{ мм}$		
1650	250	1700	1650	250	1618	1650	250	1535
	500	780		500	739		500	693
	750	548		750	520		750	494
	1000	447		1000	424		1000	407
	1250	388		1250	370		1250	355
1600	250	1110	1600	250	1035	1600	250	777
	500	553		500	519		500	480
	750	405		750	380		750	354
	1000	339		1000	317		1000	298
	1250	297		1250	280		1250	265
1550	250	664	1550	250	605	1550	250	520
	500	369		500	338		500	302
	750	281		750	260		750	232
	1000	238		1000	220		1000	202
	1250	212		1250	198		1250	182

Существенное влияние на процесс затвердевания отливки (по данным расчета МКЭ) оказывает, прежде всего, коэффициент теплоотдачи и перегрева расплава. Наименьшее влияние оказывает толщина стенки кристаллизатора. Влияние же материала трубы практически не заметно (абсолютная разница времени затвердевания в этом случае составляет ~5 с).

#### Заключение

Рассмотренный процесс формирования полой заготовки методом намораживания требует

достаточно точного соблюдения температурного режима, поскольку термоупругие напряжения в ходе затвердевания и последующего охлаждения слитка в состоянии породить трещины, даже трудно устранимые последующей радиальной ковкой. В описанной постановке задачи МКЭ возможен расчет внутренних напряжений на всех этапах изготовления полой заготовки. Существенное снижение термоупругих напряжений до уровня предотвращения разрушения достигается осуществлением процесса намораживания с



подплавлением наружной поверхности трубы-кристаллизатора.

Повышение производительности легко обеспечивает многопозиционная установка, где в дополнительную емкость плавильного или кристаллизации, исключая ликвацию и модифицирующей структуру металла, а также внутренним теплоотводом, за счет которого литейная усадка повышает плотность металла. Цилиндричность наружной поверхности и коаксиальность слитка достигаются за счет калибровки литой заготовки при ее извлечении из литейной камеры агрегата. Для этого в крышке монтируется графитовое кольцо с внутренним диаметром, соответствующим наружному диаметру литой заготовки. Процесс намораживания заканчивается таким образом, что на этом диаметре

литейного агрегата одновременно помещается несколько кристаллизаторов. Качество слитков гарантируется при соблюдении предписанных технологических режимов высокой скоростью

металл находится в полужидком состоянии, то есть между солидусом и ликвидусом. При калибровке полужидкий слой срезается графитовым кольцом. С целью повышения качества полых литых заготовок, возможно применение горячей мехобработки. Слиток после удаления концевых частей устанавливается в центры токарного станка для проточки поверхности. Если литейная машина установлена на участке РКМ, то промежуточный нагрев заготовки может быть исключен и ковка осуществлена с литейного нагрева.